

Análisis objetivo y subjetivo del ruido emitido por máquinas.

José A. Ballesteros*, Marcos D. Fernández*, Samuel Quintana*, Isabel González*

Resumen El ruido industrial producido por las máquinas es una fuente de ruido muy extendida en los países industrializados, y que afecta tanto a trabajadores como a vecinos. Dada la gran importancia de esta fuente de ruido, el grupo de Investigación y Desarrollo en Acústica (IDEA) de la Escuela Politécnica de Cuenca ha llevado a cabo diversas investigaciones centradas en la medida y evaluación del ruido producido por las mismas. Dichas investigaciones se han centrado en la evaluación tanto objetiva como subjetiva del ruido producido por las máquinas. Desde el punto de vista objetivo, se ha evaluado la potencia acústica emitida por máquinas de diversos tamaños, desde máquinas pequeñas (taladros, amoladoras, etc.) a máquinas grandes (excavadoras, dumpers, etc.), analizando el método estandarizado que mejor se adecúa a la medida de potencia acústica en cada uno de estos grupos y la emisión acústica de dichas máquinas. Desde el punto de vista psicoacústico, se han evaluado los parámetros psicoacústicos objetivos, permitiéndonos conocer en mayor detalle la emisión que presenta este tipo de máquinas. Además, se han pasado encuestas a distintas personas, con el fin de conocer la percepción subjetiva que tienen del ruido emitido por las mismas. Los resultados obtenidos con los distintos parámetros analizados (acústicos y psicoacústicos) permitió la elaboración de patrones acústicos y de un nuevo código de etiquetado de máquinas en el que se ponen de manifiesto, de forma clara y sencilla, las características del ruido emitido por las mismas y su percepción psicoacústica. Además, se han explorado nuevos procedimientos de medida en base a distintas técnicas de procesado, como por ejemplo la separación ciega de fuentes, que establecen un punto de partida que podrá permitir la medida de la potencia acústica de las máquinas evitando los problemas que presentan las técnicas estandarizadas actuales.

*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones. Escuela Politécnica de Cuenca, Campus Universitario s/n, 16071 Cuenca, Spain, josea.ballesteros@uclm.es, Marcos.Fernandez@uclm.es, Samuel.Quintana@uclm.es e Isabel.Gonzalez@uclm.es

Introducción

El ruido industrial es hoy en día uno de los agentes contaminantes más importantes, principalmente debido a su influencia en la salud de los trabajadores expuestos a altos niveles de presión sonora, tanto a nivel físico como psicológico.

Es difícil definir qué quiere decir que el ruido es un contaminante físico. Normalmente se considera el ruido como un sonido no deseado, pero esta clasificación es subjetiva, ya que un sonido puede ser agradable para unas personas y desagradable para otras, o agradable durante un determinado periodo y desagradable en otro.

Cada día, en la Unión Europea, los trabajadores están expuestos a ruido y a sus consecuentes riesgos en el lugar de trabajo, siendo los más destacables las pérdidas auditivas.

El parámetro más obvio a la hora de caracterizar el ruido es su nivel de presión sonora, no obstante, se deben tener en cuenta otros factores importantes como la duración de la exposición, la impulsividad, la frecuencia, el espectro o la distribución a lo largo de la jornada laboral. Es por ello, que las medidas de niveles objetivos no son suficientes, y se deben evaluar parámetros psicoacústicos y realizar encuestas de percepción.

En los trabajos realizados por el grupo de Investigación y Desarrollo en Acústica (IDEA) de la Escuela Politécnica de Cuenca, se han realizado estudios tanto objetivos como subjetivos del ruido producido por distintas máquinas, elaborando, a partir de ellos, patrones de emisión de las distintas familias de máquinas y un código de etiquetado que incluye tanto la evaluación objetiva como subjetiva. Además, se ha definido un nuevo procedimiento de medida de potencia sonora que permita subsanar los problemas encontrados en las técnicas de medidas estandarizadas actuales.

Evaluación objetiva del ruido de máquinas

Cuando queremos evaluar el ruido emitido por máquinas, uno de los parámetros más importantes que debemos evaluar es la potencia acústica generada por las mismas. Este parámetro representa una característica

propia de la máquina bajo ensayo, como podría ser su longitud o su peso, por lo que no varía en función de la distancia o del entorno acústico en que hagamos la medida.

Cuando medimos la potencia acústica de las máquinas, podemos elegir entre dos procedimientos estandarizados. El primero, descrito en la familia de normas ISO 374x se basa en la medida de la presión acústica emitida por la máquina. El segundo, basado en la familia de normas 9614-x, se basa en la intensidad acústica radiada por la misma.

Para realizar la medida de potencia acústica utilizando el método de presión, debemos incluir la máquina en una superficie de referencia, de tal forma que queden excluidas las partes de la misma o elementos auxiliares que no presentan emisión. Posteriormente, esta superficie de referencia se incluirá en una superficie de medida, sobre la que se determinarán las posiciones de medida, en las que se colocarán los micrófonos necesarios.

Una vez determinadas las posiciones de medida, mediremos tanto el nivel de presión sonora, como el nivel de ruido de fondo en esos puntos, determinando el nivel de potencia acústica de la máquina en base a ellos y a las características del entorno de ensayo.

En cuanto a la técnica basada en intensidad, nuevamente incluiremos la máquina en una superficie de referencia. En dicha superficie estableceremos los puntos de medida (medida por puntos de discretos) o los segmentos correspondientes (medida por barrido), realizando la medida de la intensidad sonora radiada por la máquina y calculando a partir de ella la potencia acústica de la misma (Figura 1).

Teniendo en cuenta las dos familias de normas estandarizadas de las que disponemos, resulta de interés conocer cual debemos aplicar en cada momento, para que la medida sea más rápida, fiable, etc. Teniendo esto en cuenta, se han realizado diversas comparativas de metodología en máquinas de distinto tamaño.



Figura 1. Realización de medidas por intensidad.

En el primero de estos estudios (Ballesteros et al., 2008a) tras comprobar en la medida de una mini-excavadora que no existían diferencias importantes entre los resultados obtenidos por ambos métodos, y la medida de un número considerable de máquinas (tabla 1) empleando ambas técnicas, se determinó cual se debería utilizar para la medida de máquinas manuales:

1. Para máquinas de pequeño tamaño, como máquinas manuales, es mejor utilizar el método de presión sonora, dada la dificultad que supone realizar los barridos debido al área pequeña de los segmentos.
2. A la hora de medir máquinas grandes, es preferible utilizar el método basado en intensidad sonora, ya que el número de puntos de medida que tendríamos con el método de presión es elevado, lo que conllevaría un tiempo de medida también elevado.
3. Para aquellas máquinas cuyo ruido no es constante, es mejor utilizar el método de presión con un tiempo de medida suficientemente grande para registrar un ciclo completo de la máquina. Con el método de intensidad incurriríamos en errores al tener diferencias en la intensidad medida en cada uno de los dos barridos a realizar en los respectivos segmentos.
4. Si no conocemos el entorno acústico o el nivel de ruido de fondo es elevado, es preferible utilizar el método de intensidad, ya que es más tolerable a este tipo de problemas.
5. Si la experiencia del técnico de medida con la sonda de intensidad no es suficiente, es mejor utilizar el método de presión, ya que es un método más sencillo.

Tabla 1 Relación de máquinas medidas en la primera fase.

Tipo de máquina	UNE-EN ISO 3744	UNE-EN ISO 9614-2
Compresor	6	4
Tejedoras	0	10
Fresadora	3	7
Sierra de calar	10	0
Amoladora	10	0
Taladro	10	0
Sierra escuadradora	1	9
Owerlock	0	2
Cortacésped	4	0
Amoladora	0	3
Torno	0	10
Grupo electrógeno	0	10
Imprenta offset	0	6
Motosierra	7	0
Enconadora	0	1
Mini-excavadora	1	1
Total	52	63

Tras la realización de este estudio, se procedió a comprobar sobre máquinas de movimiento de tierras qué método era mejor utilizar (Ballesteros et al., 2008b). Para ello, se tuvieron en cuenta, no sólo los dos anteriores, sino también el estándar específico para este tipo de máquinas.

Este estándar, descrito en la norma UNE-74100, establece que debemos definir una superficie de referencia hemiesférica a partir de la longitud característica de la máquina, en la que situaremos 6 puntos de medida a distintas alturas como puede observarse en la figura 2.



Figura 2. Realización de medidas según la norma UNE-74100.

Tras comparar los tres métodos en la medida de una mini-excavadora, y la medida de distintas máquinas (tabla 2) entre las que se incluyen, no sólo máquinas de movimiento de tierras, sino también otras similares en cuanto a tipo y tamaño, se determinaron una serie de recomendaciones, además de las anteriormente descritas, a la hora de medir este tipo de máquinas:

1. El mejor procedimiento para medir la potencia acústica de este tipo de máquinas, así como otras de gran tamaño, es el método de intensidad, ya que es un método más rápido. El número de puntos de medida necesarios según el método de la norma UNE-EN ISO 3744 es elevado, y el proceso de montaje según el método de la norma UNE 74100 es lento.
2. Si tenemos una máquina cuyo ruido no es constante con el tiempo, es mejor utilizar los métodos basados en la presión acústica emitida por la máquina. La elección entre estos dos métodos vendrá determinada por el número de puntos de medida al aplicar la norma UNE-EN ISO 3744, así como de la altura de los micrófonos necesaria según la norma UNE 74100.

Tabla 2 Relación de máquinas medidas en la segunda fase.

Tipo de máquina	UNE-EN ISO 3744	UNE-EN ISO 9614-2	UNE 74100
Retroexcavadora	0	5	0
Mixta			
Camión hormigonera	0	5	0
Mini-excavadora	1	5	1
Plataforma elevadora	0	1	0
Excavadora	0	5	0
Manitude	0	1	0
Dumper	0	4	0
Apisonadora	0	1	0
Total	1	32	1

Otro ítem importante en esta investigación consistió en la evaluación del ruido emitido por grandes máquinas, sobre todo aquellas relacionadas con el sector de la construcción (González et al., 2009).

En este caso, se procedió a la evaluación de la potencia acústica de 5 familias de máquinas utilizadas principalmente en el sector de la construcción: retroexcavadoras mixtas, mini-excavadoras, excavadoras, camiones hormigonera y dumpers. Como conclusiones del estudio, se puso de manifiesto lo siguiente:

- Las grandes máquinas utilizadas en el sector de la construcción presentan un nivel de emisión elevado, debido en muchos casos a un mal mantenimiento de las mismas, que hace que su nivel de emisión aumente a medida que aumenta su tiempo de uso.
- Las máquinas más grandes (Retroexcavadoras mixtas, excavadoras y camiones hormigonera) presentan un espectro de emisión plano con un descenso de la emisión a alta frecuencia, sin embargo, las máquinas con un tamaño menor (mini-excavadoras y dumpers)

presentan un espectro con un mayor nivel de emisión a baja frecuencia que disminuye a medida que aumenta la frecuencia.

Esta investigación se enmarcó dentro del proyecto regional "Caracterización acústica de materiales y medida del ambiente sonoro para el sector de la construcción - CAMMAS (JCCM, Ref. PAI07-0101-3656)".

Evaluación subjetiva del ruido de máquinas

Además de la evaluación objetiva del ruido producido por distintas máquinas a partir de la medida de su potencia acústica, se han realizado diversos estudios acerca de la calidad sonora de este tipo de ruido (Fernández et al., 2007). Dichos estudios se han realizado evaluando tanto los parámetros psicoacústicos objetivos, como los resultados de encuestas a la población acerca de su opinión sobre el ruido producido por dichas máquinas.



Figura 3. Realización de medidas con un HATS.

Para la valoración de los parámetros psicoacústicos objetivos (Fernández et al., 2007) se graba el ruido producido por la máquina con un HATS (Simulador de cabeza y torso - Head And Torso Simulator) situado en la posición del trabajador, como se observa en la figura 3, el cual presenta dos micrófonos localizados en las orejas artificiales de un dummy que simula la cabeza y el torso humanos. A partir del procesado de estas grabaciones se determinan ciertos parámetros relacionados con la percepción humana: Loudness (impresión de sonoridad), Sharpness (impresión de alta frecuencia), Roughness (impresión causada por modulaciones de baja frecuencia), Fluctuation Strength (impresión causada

por modulaciones de frecuencia media) o SIL (interferencia causada por el sonido con el habla normal - Speech Interference Level).

Tras obtener los parámetros psicoacústicos objetivos (Fernández et al., 2007), se procede al diseño de la encuesta de percepción. En el estudio llevado a cabo se han realizado dos test de semántica diferencial, en los que el oyente debe marcar una opción en una escala entre dos adjetivos opuestos. El primero de los test sirve para evaluar la capacidad de los oyentes, y así tener resultados coherentes. Una vez pasado el primer test, el segundo consiste en la evaluación de la máquina propiamente dicha. El test de valoración se definió de forma que los adjetivos utilizados fueran fácilmente entendibles y tuvieran una relación con los parámetros objetivos, tal y como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Encuesta de percepción.

Pregunta	Relacionado con:
Fuerte / Débil	Presión sonora promedio, Nivel de presión sonora Loudness
Constante / Variable	Variación del sonido con el tiempo, Rougness, Fluctuation Strength
Cíclico / No cíclico	Patrón de repetición del sonido, Roughness, Fluctuation Strength
Envolvente / Detallado	Existencia de picos importantes, Sharpness
Seco / Reverberante	Extinción del sonido, reverberación, viveza, Loudness, Roughness, Fluctuation Strength
Presencia / Ausencia de agudos	Contenido en alta frecuencia, Sharpness
Presencia / Ausencia de bajos	Contenido en baja frecuencia, Roughness, Fluctuation Strength
Compatible / Incompatible con el habla	Interferencia con una conversación simultánea, SIL
Agradable / Desagradable	Pleasantness, Psychoacoustic annoyance
Tiempo (0-8 h) que estaría dispuesto a trabajar con la máquina	Máximo nivel de exposición sonora, Pleasantness, Psychoacoustic annoyance

El procedimiento descrito se aplicó a distintas familias de máquinas, como por ejemplo taladros (Fernández et al., 2007), observándose cómo el ruido percibido por este tipo de máquinas presenta una impresión general bastante negativa y un usuario medio sólo estaría dispuesto a trabajar con ella 3 h. de una jornada de 8 h. Otro ejemplo es el de las sierras de calar (Fernández et al., 2009a), en el que se observó que la impresión de general volvía a ser negativa y un usuario medio no estaba dispuesto a trabajar con ella más de media hora de una jornada de 8h. Además, se ha observado que la presencia de agudos en el ruido de estas familias de máquinas es muy marcada, por lo que se recomienda modificar el diseño de las mismas para conseguir una mayor agradabilidad.

Este estudio se enmarcó dentro del proyecto nacional "Caracterización del campo sonoro en ambientes industriales. Efectos psicoacústicos y bases de datos – CICYT, Ref DPI 2004-07073-C02-02" y del proyecto regional "Caracterización acústica de materiales y medida del ambiente sonoro para el sector de la construcción - CAMMAS (JCCM, Ref. PAI07-0101-3656)".

A parte de utilizar un HATS para llevar a cabo los estudios psicoacústicos, existe otro método que consiste en usar unos micrófonos binaurales localizados en los oídos del sujeto. Para comprobar si se obtienen los mismos resultados con ambas técnicas, se procedió a realizar medidas sobre diversos tipos de máquinas tanto con el HATS, como con los micrófonos binaurales, los cuales se localizaron en los oídos de personas con distinta altura, peso, sexo, complexión, etc. (Ballesteros et al., 2009a), observándose que no existían diferencias significativas entre los resultados obtenidos con ambas técnicas.

Teniendo esto en cuenta, se recomienda utilizar los micrófonos binaurales para medidas de máquinas manuales con bajos niveles de emisión de ruido, ya que al utilizar el HATS, el cuerpo del técnico que deberá utilizar la máquina influirá en la medida. Por otro lado, se recomienda usar el HATS para la medida de máquinas medianas y grandes, así como aquellas con niveles elevados de emisión sonora, ya que en otro caso, el técnico estaría expuesto a altos niveles de presión sonora.

Otros resultados

Además de la evaluación de los parámetros objetivos y subjetivos de las máquinas, se han obtenido una serie de resultados adicionales, como son

los patrones acústicos de las máquinas bajo ensayo y la elaboración de un código de etiquetado de máquinas en función no sólo de sus parámetros de emisión, sino también de la evaluación psicoacústica llevada a cabo.

Patrones acústicos

Los estudios anteriores, tanto objetivos como subjetivos, permitieron obtener el patrón acústico de varias familias de máquinas. Estos patrones acústicos consisten en encontrar descriptores comunes y relaciones entre todas las máquinas estudiadas que tengan algo en común, normalmente, que realicen la misma función, por lo que parece lógico pensar que su emisión acústica también será similar.

Las posibilidades que ofrece la realización de los patrones acústicos son elevadas. Si a la hora de realizar la encuesta de percepción se tienen en cuenta los posibles compradores del producto, se podría observar el grado de aceptación de la misma en materia de ruido. Por otro lado, si se obtiene un resultado negativo, el resultado debería evaluarse por el departamento de desarrollo del producto para adecuar el sonido a los gustos de los clientes. Además, podría observarse si una determinada familia de máquinas produce determinados efectos en los trabajadores, o si estos necesitan equipos de protección individual.

Es importante tener en cuenta que este proceso es dinámico y los gustos de los posibles clientes cambian con el paso de los años, por lo que el patrón acústico de la máquina deberá adaptarse a estos cambios.

Los parámetros necesarios para obtener el patrón de un grupo o familia de máquinas serán: potencia sonora, Loudness, Roughness, Sharpness, Fluctuation Strength y SIL, así como los resultados de las encuestas de percepción psicoacústica. Estos parámetros deben compararse entre un número suficiente de máquinas, de forma que se garantice la representatividad estadística de los resultados.

Para determinar el patrón acústico de una familia de máquinas, realizamos el siguiente proceso:

- Se compara el espectro de potencia acústica, en octavas y tercios de octava, de un número representativo de máquinas.
- Se realiza un análisis de regresión para obtener un espectro promedio con un R^2 tan próximo a 1 como sea posible.

- A partir de las medidas psicoacústicas objetivas se obtienen la media y la desviación estándar entre todas las máquinas medidas.
- Se procesan los resultados de las encuestas psicoacústicas.
- Con estos tres análisis se cruzan todos los datos para extraer las relaciones que definan el patrón.
- Finalmente, se comparan los patrones obtenidos para distintas familias de máquinas con el fin de observar si existen relaciones entre las mismas.

Dada la complejidad de esta tarea se creó una base de datos alojada en web (NOMAD) que permitía crear informes de las distintas máquinas y hacer procesados entre los distintos parámetros (Fernández y Recuero, 2005).

En (Suárez, Fernández y Blas, 2005) se definió el patrón acústico de un taladro a partir de la medida de 10 taladros de distintas marcas y modelos. Los resultados muestran lo siguiente:

- El espectro muestra una tendencia común entre todos los taladros medidos, que puede predecirse a partir de una curva inversa ($R^2 = 0,949$) o de una curva-S ($R^2 = 0,955$).
- Se obtienen correlaciones claras entre los parámetros psicoacústicos y las magnitudes físicas, especialmente para el nivel de potencia acústica y el Loudness.
- Existe una gran contribución en altas frecuencias.

En (Fernández et al., 2009b) y (Fernández et al., 2011) se procedió a la evaluación del patrón acústico de la familia de sierras escuadradoras a partir de las medidas de 10 máquinas de distintas marcas y modelos, observándose los siguientes resultados:

- El espectro medio de estas máquinas puede dividirse en dos regiones: en la primera, hasta 1250 Hz, podemos predecir su comportamiento con una curva inversa que presenta una correlación de 0,930 sobre 1; a partir de 1600 Hz la curva cúbica presenta una correlación de 0,907.
- El patrón muestra un mayor nivel a baja frecuencia que decrece hasta la segunda región, donde se incrementa de nuevo con un aumento de nivel hasta los 3150 Hz.
- El nivel de potencia medio es de 90,3 dB, nivel bastante elevado y que sugiere el uso de protectores auditivos para el uso de este tipo de máquinas.
- La correlación entre el nivel de potencia y el Loudness es también relevante.

- Las respuestas a las encuestas son bastante homogéneas, contando con una desviación muy baja, siendo remarcables los resultados obtenidos para el caso de la evaluación de la molestia (3,87 sobre 5, siendo 5 el grado de máxima molestia) y el corto periodo de tiempo que se está dispuesto a utilizar la máquina (3,13 horas de una jornada de 8 h.).
- En lo referente a la relación entre los resultados de la encuesta con otros parámetros, la primera pregunta (fuerte/débil) presenta una alta correlación con el Loudness, y la agradabilidad con el Sharpness.
- El Sharpness es el parámetro que mejor define este tipo de máquinas, considerándose como molesta y presentando unos niveles de emisión elevados.

Este estudio se enmarcó dentro del proyecto nacional "Caracterización del campo sonoro en ambientes industriales. Efectos psicoacústicos y bases de datos – CICYT, Ref DPI 2004-07073-C02-02" y del proyecto regional "Caracterización acústica de materiales y medida del ambiente sonoro para el sector de la construcción - CAMMAS (JCCM, Ref. PAI07-0101-3656)".

Elaboración de un código de etiquetado

La elaboración de un código de etiquetado parte de que se está comprobando que no es suficiente con mostrar en las etiquetas de las máquinas los parámetros típicos de presión y potencia acústica, sino que se debe incluir también información psicoacústica. Además, los fabricantes, aunque no den información psicoacústica, sí que utilizan ésta durante el proceso de fabricación, ya que también consideran que la escala en dB es insuficiente.

En (Fernández, Recuero y Blas, 2008) se define el nuevo código de etiquetado de máquinas. Éste código de etiquetado debe cubrir al menos dos aspectos: la potencia sonora y la calidad sonora.

Tras la realización de medidas de potencia acústica y parámetros psicoacústicos definidos anteriormente, y su correlación con los parámetros objetivos clásicos, el máximo tiempo de exposición sonora, el riesgo de pérdidas auditivas y los equipos de protección auditiva más adecuados, así como la evaluación de los parámetros psicoacústicos

subjetivos a través de encuestas, se definen las características que debería cumplir el código de etiquetado propuesto:

- En la parte objetiva, se establece la siguiente escala de colores de acuerdo con el nivel de presión sonora:
 - $L_{pA} \leq 80$ dBA → No hay riesgo → Verde
 - $80 \text{ dBA} < L_{pA} \leq 85$ dBA → Bajo riesgo → Amarillo
 - $85 \text{ dBA} < L_{pA} \leq 90$ dBA → Riesgo medio → Naranja
 - $L_{pA} \geq 90$ dBA → Riesgo elevado → Rojo
- En la parte psicoacústica objetiva se elige el parámetro de molestia psicoacústica (OPA – Objective Psychoacoustics Annoyance), ya que unifica los valores obtenidos para Loudness, Sharpness, Roughness y Fluctuation Strength, modificándolo para evitar la alta variabilidad de los resultados obtenidos (OPA). La escala de colores en este caso quedaría de la siguiente forma:
 - $OPA' \leq 90$ → muy aceptable → Verde
 - $90 < OPA' \leq 100$ → aceptable → Amarillo
 - $100 < OPA' \leq 120$ → molesto → Naranja
 - $OPA' \geq 120$ → muy molesto → Rojo
- En la parte psicoacústica subjetiva hay dos preguntas en la encuesta que ayudan a extraer la información necesaria sobre la aceptabilidad de la máquina, estas son las preguntas 9 y 10, las cuales preguntan sobre si el sonido es agradable o desagradable en una escala de 1 a 5, y el número de horas que se estaría dispuesto a trabajar con esa máquina de una jornada de ocho horas en una escala de 0 a 8 h. en pasos de media hora. Con las respuestas a estas dos preguntas se determina un nuevo índice definido como molestia psicoacústica subjetiva (SPA - Subjective Psychoacoustic Annoyance).

Para el código de etiquetado, se ha tenido en cuenta además la reacción de las personas ante los colores propuestos: verde evoca seguridad, amarillo indica actividad, naranja evoca agitación y miedo y el rojo sugiere peligro y excitación.

Un ejemplo del código de etiquetado resultante se muestra en la figura 4, donde el cuadro con la letra O muestra la evaluación objetiva y el cuadro con la letra S la subjetiva. El cuadro objetivo se colorea de acuerdo a la escala establecida para el nivel de presión sonora en ponderación A y lleva el valor obtenido para la potencia acústica de la máquina. El cuadro de evaluación subjetiva se ha coloreado de acuerdo a la escala establecida

para el parámetro OPA', y el número muestra el resultado del parámetro SPA.



Figura 4. Ejemplo de etiquetado.

Teniendo todo esto en cuenta, el código de etiquetado muestra una gran cantidad de información:

- Nivel de presión sonora en ponderación A.
- Riesgo de exposición sonora.
- Evaluación de la calidad sonora.
- Molestia establecida por los usuarios.

Separación ciega de fuentes

Desde el comienzo de la investigación del grupo IDEA en relación al ruido emitido por máquinas, se observaron algunos problemas de las técnicas de medida estandarizadas a la hora de medir la potencia acústica generada por las máquinas.

El principal problema radica en el ruido de fondo presente en el lugar de ensayo, así, en un hipotético caso en el que el ruido de fondo fuera elevado, no sería posible realizar la medida por ninguno de los dos métodos estandarizados, ya que no existiría suficiente relación señal a ruido en el caso del método de presión y la intensidad parásita haría inviable la realización de la medida con el método de intensidad.

En (Ballesteros et al. 2005) se presenta el modelo inicial del nuevo método de medida, el cual se sirve de las posiciones de medida descritas en la normativa de medida de potencia por presión UNE-EN ISO 3744, pero ahora puede haber más de una fuente en funcionamiento al mismo tiempo.

Una vez definidas las posiciones de medida, se grabarán las señales en los puntos de medida, además de al menos tantas señales de ruido ambiente como máquinas interferentes haya.

Tras la grabación de todas las señales, se introducirán en los algoritmos de separación ciega de fuentes (BSS – Blind Source Separation), proponiéndose como mejora del sistema un preprocesamiento con transformada Wavelet antes de introducir las señales en los algoritmos BSS.

Para identificar, de entre todas las señales de salida del sistema de procesamiento, cual se corresponde con la máquina de interés, se realiza una correlación en frecuencia con una señal grabada en la que sólo esté en funcionamiento la máquina de interés, y se elegirá la señal de salida que presente una mayor correlación.

Obtenidas las señales propias de la máquina bajo ensayo, realizamos el mismo procesamiento para determinar la potencia acústica de la máquina que el descrito en la norma de medida de potencia por presión UNE-EN ISO 3744.

El esquema general del procedimiento se muestra en la figura 5.

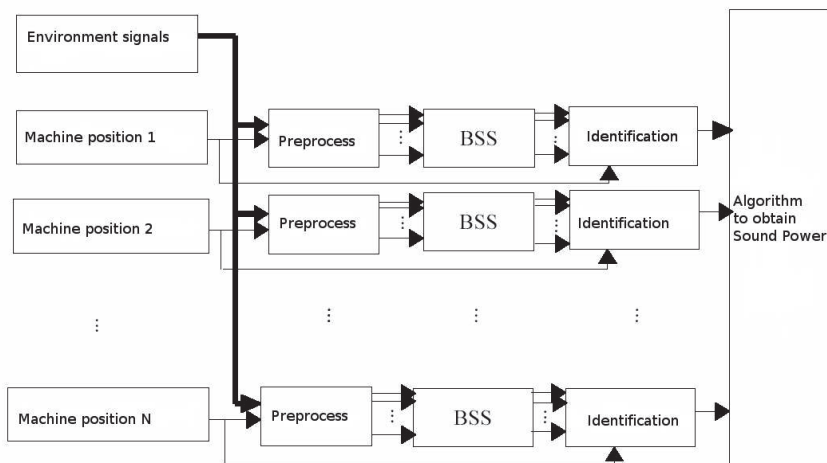


Figura 5. Esquema general de procesamiento con BSS.

Para evaluar la bondad del método propuesto, en (Ballesteros et al. 2005) se realizó la grabación de todas las señales necesarias en laboratorio de forma independiente, es decir, no se grabó la mezcla real, sino que se procedió a mezclarlas posteriormente mediante procesamiento software.

Las mezclas realizadas fueron lineal y simulada, con y sin ruido blanco gaussiano.

Los resultados obtenidos mostraron un alto nivel de correlación entre las señales obtenidas a la salida de los algoritmos BSS y las que se deberían obtener.

En (Fernández, Recuero y Ballesteros, 2007) se incorpora además un análisis de distintas formas de identificación de la señal de salida del algoritmo BSS para saber cuál es la señal de la máquina de interés. Las formas de identificación propuestas consistían en lo siguiente:

- A partir de la señal original: Esta técnica fue propuesta como una técnica de valoración de los resultados obtenidos con las otras dos, consistiendo en la evaluación de la correlación frecuencial entre las señales obtenidas a la salida de los algoritmos BSS y una señal propia de la máquina.
- A partir de la mezcla: Esta técnica consistía en realizar la correlación frecuencial entre las señales a la salida de los algoritmos BSS y la señal mezcla en uno de los puntos de interés de la máquina bajo ensayo. Como esta técnica identificaba la propia mezcla como la señal de la máquina, se decidió establecer un 75% de parecido como punto de discriminación, de forma que si la correlación era superior a este 75% se consideraba que se había identificado la propia mezcla y se proseguía con el proceso de identificación.
- Desde el patrón acústico de la máquina: A partir del espectro de potencia promedio se determinaba la señal que presentaba una densidad de energía similar a la del patrón.

Dado que los mejores resultados se obtenían comparando con una señal original de la propia máquina, se eligió éste como método de identificación. Esta técnica presenta el problema de tener que desconectar el resto de máquinas durante el tiempo de medida de esta señal de referencia, pudiendo estar conectadas durante el resto de la medida, lo que supone una ventaja respecto a las técnicas estándar. Además, si las máquinas interferentes presentan patrones acústicos distintos a la de interés, es probable que esta técnica arroje buenos resultados.

Finalmente, se probó la técnica propuesta en un entorno real, concretamente en una fábrica de maderas, donde se procedió a la medida de una cepilladora-perfiladora automática, comparando los resultados con los obtenidos al realizar la medida con la técnica de intensidad durante los periodos en los que el resto de máquinas estaban desconectadas, ya que en otro caso, la intensidad parásita era muy elevada.

Los resultados obtenidos mostraron que aunque existen diferencias entre las dos técnicas, la técnica iba en la buena dirección para el propósito que se había marcado.

Finalmente, en (Ballesteros et al., 2009b) se evaluó la aplicación de un preprocesado mediante cepstrum antes de incluir las señales en el algoritmo BSS, dado que permite transformar señales que están en un dominio no lineal a un dominio lineal.

Para evaluar la bondad de este preprocesado se aplicó esta técnica a la medida de la potencia sonora de un cortacésped, teniendo como fuentes interferentes una amoladora radial y un compresor, tal y como aparece en la figura 6, y posteriormente se realizó la misma medida dejando el compresor como fuente de interés y las otras dos como interferentes.



Figura 6. Realización de medidas para evaluar el preprocesado Cepstrum.

Como resultados del estudio se observó que la correlación frecuencial de la señal obtenida con la original era mayor en el caso de utilizar este preprocesamiento.

Como líneas futuras a este estudio se están evaluando otra serie de preprocesados, con distintas transformaciones de señal, con el fin de obtener la cadena de procesamiento que arroje los mejores resultados.

Parte de este estudio se enmarcó dentro del proyecto nacional "Caracterización del campo sonoro en ambientes industriales. Efectos psicoacústicos y bases de datos – CICYT, Ref DPI 2004-07073-C02-02".

Conclusiones

El ruido industrial es uno de los problemas de ruido más acusados hoy en día en los países desarrollados.

Los trabajos realizados por el grupo IDEA en este ámbito han ido enfocado a la evaluación objetiva y subjetiva del ruido producido por máquinas de distintas familias, tamaños, marcas, etc.

La evaluación objetiva de este tipo de máquinas se ha basado principalmente en la evaluación del nivel de potencia acústica emitida por las mismas, utilizando para ellos tres familias de normas estandarizadas: UNE-EN ISO 374x para la medida de la potencia por presión, UNE-EN ISO 9614-x para la medida por intensidad y UNE-74100 para la medida de la potencia acústica en máquinas de movimiento de tierras, comparándolas entre sí y estableciendo una serie de recomendaciones sobre cuándo se debe utilizar cada una de ellas.

La evaluación subjetiva del ruido emitido por este tipo de máquinas se ha basado en dos pilares diferentes, por un lado se han evaluado los parámetros psicoacústicos objetivos a través de medidas realizadas con un HATS, y por otro lado se ha tenido en cuenta la opinión de la población sobre el ruido producido por dichas máquinas a través de la realización de encuestas. Además, se han comparado los resultados obtenidos con el HATS con los obtenidos al utilizar micrófonos binaurales para este tipo de medidas.

Los resultados de los estudios objetivos y subjetivos han llevado a la determinación de los patrones acústicos de distintas familias de máquinas, así como a la definición de un nuevo código de etiquetado que tiene en cuenta ambos tipos de estudios, objetivos y subjetivos.

Para intentar solventar los problemas observados en los métodos estandarizados para la evaluación de la potencia acústica en máquinas, se ha desarrollado un nuevo procedimiento de medida mediante la aplicación de técnicas de separación ciega de fuentes utilizando distintos preprocesamientos.

Bibliografía

Ballesteros, J.A., Fernández, M.D., Sánchez, C., Rieta, J.J., Alcaraz, R. (2005). Aplicación de los métodos BSS a la medida de potencia acústica en máquinas. X Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Gandía.

Ballesteros, J. A., Fernández, M. D., Quintana, S., Suarez, I., Rodríguez, L. (2008a). Comparison of International Standards for Measuring Sound Power in Tool-Machines. Acoustics-'08 (Euronoise 2008 - 155th Meeting ASA). Paris.

Ballesteros, J.A., Recuero, J., Fernández, M.D., Quintana, S., González, I. (2008b). Comparison of international standards for measuring sound power in earthworks machines. International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2008). Leuven.

Ballesteros, J.A., Fernández, M.D., Quintana, S., González, I., Rodríguez, L. (2009a). Comparison of Methods for Measuring Sound Quality through HATS and Binaural Microphones. AES 126th Convention. Munich.

Ballesteros, J.A., Fernández, M.D., Quintana, S., González, I., Rodríguez, L. (2009b). Blind Source Separation in the Cepstrum Domain. Application to the Sound Power Measurement of Machines. 16th International Congress on Sound and Vibration. Cracovia.

Fernández, M., Recuero, M. (2005). Data base for machinery noise (NOMAD), 12 International Congress on Sound and Vibration, Lisboa.

Fernández, M.D., Recuero, M., Ballesteros, J.A. (2007). Measurement of Acoustic Power through BSS Techniques. First European Forum on efficient solutions for managing occupational noise risks -Noise at Work. Lille.

Fernández, M. D., Recuero, M., Ballesteros, J.A., Blas, J. M. (2007). Improvement of the Working Place through Psychoacoustic Assessment of the Noise Emitted by the Machines. 19th International Congress on Acoustics -ICA2007MADRID. Madrid.

Fernández Berlanga, M.D., Recuero López, M. Y Blas Arnau, J.M. (2008). Definition of a labelling code for the noise emitted by machines. Applied Acoustics 69, pp. 141 - 146.

Fernández, M.D., Ballesteros, J.A., Suárez, I., Quintana, S., González, I. (2009a). Psychoacoustic Assessment of the Noise Emitted by the Machines. The Case of Grinders. AES 126th Convention. Munich.

Fernández, M. D., Ballesteros, J.A., Suárez, I., Quintana, S., González, I., Rodríguez, L. (2009b). Acoustic Pattern of the Panel Saws Family. 16th International Congress on Sound and Vibration. Cracovia.

Fernández, M.D., Ballesteros, J.A., Suárez, I., Quintana, S., González, I., Rodríguez, L. (2011). Sound Pattern of the Panel Saws Family. *International Journal of Acoustics and Vibration*. 16 - 1, pp. 12 -16.

González, I., Rodríguez, L., Recuero, J., Ballesteros, J.A., Fernández, M.D., Quintana, S. (2009). Sound Power Emitted by Big Machines in the Construction Sector. *Euronoise 2009*. Edimburgo.

Suárez, I., Fernández, M.D., Blas, J.M. (2005). Patrón acústico de un taladro. *X Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*. Gandía.

